

1 Introduction

Einleitung

Content This dissertation focuses on indirect condition monitoring of sheet-metal stamping tools using acoustic emission data. The primary objective is to develop a novel robust framework for extracting, preprocessing, and analyzing acoustic emission signals during fineblanking, a sheet-metal stamping process. Integral to this framework are data mining and machine learning algorithms, which are indispensable for efficiently handling the complexity and high dimensionality of acoustic emission data. These tools are crucial for deriving accurate, predictive insights that enable operational improvements. In light of stringent sustainability targets and increasing energy and material costs, this research paves the way to advanced wear monitoring and thus optimized resource utilization in sheet-metal stamping processes, serving both economic and environmental objectives.

Motivation The EUROPEAN UNION intends to reduce greenhouse gas emissions to at least 55% below 1990 levels until the year 2030 [EURO21a] and to be climate-neutral by 2050 [EURO21b]. Lightweight design in automotive represents an important building block to reducing CO₂ emissions by weight reduction, e.g., with the increasing usage of higher-strength steels [MCKI12] with a high strength-to-weight ratio in sheet-metal forming processes, such as sheet-metal stamping, which represents one of the most common manufacturing techniques for vehicle components [KLOC16]. The transition towards electric vehicles further accentuates this development, given the additional weight of batteries [JOOS12].

The increasing usage of higher-strength steels, in turn, leads to higher process forces and stresses on sheet-metal stamping tools [SHAN19], which result in excessive wear of critical tool components, such as the punch [VOIG21]. Excessive wear impairs the economic viability of sheet-metal stamping processes such as fineblanking since it leads to reject production and unplanned downtimes [UNTE21]. With already tight margins in sheet-metal stamping [KUBI22], the recent development in energy [STAT23a] and steel markets [STAT23b], especially in Germany, has further exacerbated the cost pressure on companies through increased operating and material costs.

To avoid reject production and to reduce unplanned downtimes and therefore optimize resource utilization in sheet-metal stamping, the tool wear must be controlled through timely maintenance. Understanding the severity of wear sufficiently fine-granularly is essential for this control. However, due to the closed tool design in sheet-metal stamping, the wear of critical tool components is not observable directly during the process.

Research gap Past approaches often relied on knowledge-based methods such as finite element simulations to design and operate sheet-metal stamping processes and to estimate suitable maintenance intervals. While these computational tools are crucial, they are limited by oversimplified assumptions that do not account for the variable conditions encountered in industrial environments [LIEW22]. Hence, numerous efforts were made recently by industry and research to monitor suitable quantities during sheet-metal stamping to infer the wear state (condition monitoring) and derive optimal maintenance intervals (predictive maintenance) with traditional signal processing methods and machine learning algorithms.

However, to this day, condition monitoring (and thus predictive maintenance) remains an open problem in sheet-metal stamping [UNTE23]. The reasons for this are diverse. MCKINSEY & COMPANY distilled main roadblocks that generally stand in the way of successful predictive

maintenance programs [McK121]. The roadblocks 'Insufficient data', 'Lack of capabilities', and 'Low economic return' (see Figure 1.1) will be addressed within this work as follows.

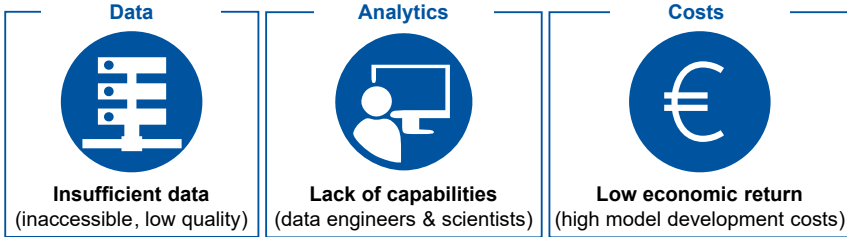


Figure 1.1: Roadblocks for successful predictive maintenance programs ([McK121]) addressed within this dissertation.

Hindernisse für erfolgreiche Projekte im Bereich der vorrausschauenden Wartung, die in dieser Dissertation behandelt werden.

Research approach Within this dissertation, blueprints for data preprocessing and data analysis pipelines are developed to monitor the wear state of the punch during fineblanking in a laboratory (yet industrial-grade) and in an industrial fineblanking setting with acoustic emission signals. Acoustic emission sensors are particularly suitable for industrial sheet-metal stamping, due to their low cost and straightforward installation process. However, in contrast to force sensors, the signals are harder to interpret [KOLL18] and preprocess due to the complexity of the resulting signals.

These challenges are managed by leveraging and combining suitable algorithms. A pipeline that leverages data mining techniques to systematically extract signal segments that contain information about the punch wear and subsequently uncover underlying patterns within the data is developed to address the problem of 'Insufficient data'. Furthermore, a proxy for the punch wear is proposed, observed, and evaluated in the laboratory setting and used to label a comprehensive dataset. This dataset is used to train and evaluate supervised machine learning models from both a performance and an explainable AI perspective. The results of the analyses are applied to the industrial datasets by developing a scalar tool condition monitoring indicator and evaluating its evolution throughout the datasets. It is shown that the indicator contains information to identify stroke series that were ultimately discontinued earlier than expected, thereby providing critical insights into the underlying dynamics of industrial fineblanking processes. These insights facilitate improved decision-making, enabling proactive maintenance strategies that can preempt costly failures and optimize production efficiency. The work documented in this dissertation thus directly addresses the challenges of 'Lack of capabilities' and 'Low economic return' in predictive maintenance programs by proposing and evaluating data-driven modeling approaches and pipelines and thus contributing to reducing the costs associated with model development.

Contribution Through the aforementioned work documented within this dissertation it contributes to the knowledge of condition monitoring in sheet-metal stamping processes by providing a novel data-driven framework to extract, preprocess, and analyze acoustic emission data for punch wear monitoring in fineblanking. Furthermore, a set of important signal features for punch wear prediction is derived from extensive data collection and analysis.

Einleitung

Inhalt Diese Dissertation widmet sich der indirekten Zustandsüberwachung von Stanzwerkzeugen anhand von Körperschallsignalen. Das Hauptziel ist die Entwicklung eines neuartigen, robusten Frameworks für die Extraktion, Vorverarbeitung und Analyse dieser Signale während des Feinschneidens, einem Stanzverfahren. Integraler Bestandteil dieses Frameworks sind Data-Mining- und maschinelle Lernalgorithmen, die für die effiziente und effektive Analyse komplexer und hochdimensionaler Daten unerlässlich sind. Diese Werkzeuge sind entscheidend für die Gewinnung präziser, prädiktiver Erkenntnisse, die Verbesserungen im Fertigungsbetrieb ermöglichen. Angesichts strenger Nachhaltigkeitsziele und steigender Energie- und Materialkosten ebnet diese Forschung den Weg zu einer fortschrittlichen Verschleißüberwachung und damit zu einer optimierten Ressourcennutzung in Stanzprozessen, die sowohl wirtschaftlichen als auch ökologischen Zielen dient.

Motivation Die EUROPÄISCHE UNION beabsichtigt, die Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2030 auf mindestens 55 % unter das Niveau von 1990 zu senken [EURO21a] und bis 2050 klimaneutral zu sein [EURO21b]. Der Leichtbau im Automobilbereich ist ein wichtiger Baustein zur Reduzierung der CO₂-Emissionen durch Gewichtsreduzierung, z.B. durch den zunehmenden Einsatz von höherfesten Stählen mit einem hohen Verhältnis von Festigkeit zu Gewicht in Blechumformungsverfahren wie dem Stanzen, das eines der gängigsten Fertigungsverfahren für Fahrzeugkomponenten darstellt [KLOC16]. Der Übergang zu Elektrofahrzeugen verstärkt diese Entwicklung noch aufgrund des zusätzlichen Gewichts der Batterien [JOOS12].

Der zunehmende Einsatz von höherfesten Stählen wiederum führt zu höheren Prozesskräften und Spannungen bei Stanzwerkzeugen [SHAN19], die zu übermäßigem Verschleiß von kritischen Werkzeugkomponenten wie dem Stempel [VOIG21] führen. Übermäßiger Verschleiß beeinträchtigt die Wirtschaftlichkeit von Stanzprozessen wie dem Feinschneiden, da er zu Ausschussproduktion und ungeplanten Stillstandszeiten führt [UNTE21]. Bei ohnehin knappen Margen beim Stanzen [KUBI22] hat die jüngste Entwicklung auf den Energie-[STAT23a] und Stahlmärkten [STAT23b], insbesondere in Deutschland, den Kostendruck auf die Unternehmen durch gestiegene Betriebs- und Materialkosten weiter verschärft.

Um die Produktion von Ausschuss zu vermeiden und ungeplante Stillstandszeiten zu reduzieren und damit die Ressourcenausnutzung bei Stanzprozessen zu verbessern, muss der Werkzeugverschleiß durch rechtzeitige Wartung kontrolliert werden. Ein hinreichend feingranulares Verständnis der Schwere des Verschleißes ist für diese Kontrolle unerlässlich. Aufgrund der geschlossenen Werkzeugkonstruktion beim Stanzen ist der Verschleiß kritischer Werkzeugkomponenten jedoch nicht direkt während des Prozesses beobachtbar.

Forschungslücke Frühere Ansätze stützten sich häufig auf wissensbasierte Methoden wie Finite-Elemente-Simulationen, um Stanzprozesse auszulegen und um geeignete Wartungsintervalle im Voraus abzuschätzen. Diese Methoden sind zwar weiterhin von entscheidender Bedeutung, werden durch stark vereinfachende Annahmen den variablen Bedingungen in der industriellen Umgebung allerdings nicht gerecht [LIEW22]. Daher wurden in letzter Zeit von Industrie und Forschung zahlreiche Anstrengungen unternommen, um geeignete Prozesssignale während des Stanzens zu überwachen und daraus mit Hilfe traditioneller Signalverarbeitungsmethoden und Algorithmen des maschinellen Lernens den Verschleißzustand (Zustandsüberwachung) und in Folge dieses optimale Wartungsintervalle (vorausschauende Wartung) abzuleiten.

Bis heute stellt die Zustandsüberwachung (und damit die vorausschauende Wartung) beim Stanzen allerdings ein offenes Problem dar [UNTE23]. Die Gründe dafür sind vielfältig. MCKINSEY & COMPANY hat die wichtigsten Hindernisse herausgearbeitet, die erfolgreichen

Projekten zur vorausschauenden Wartung im Allgemeinen im Wege stehen [McK121]. Die Hindernisse 'Unzureichende Daten', 'Mangel an Fähigkeiten' und 'Geringe Wirtschaftlichkeit' (siehe Abbildung 1.2) werden in dieser Arbeit wie folgt adressiert.

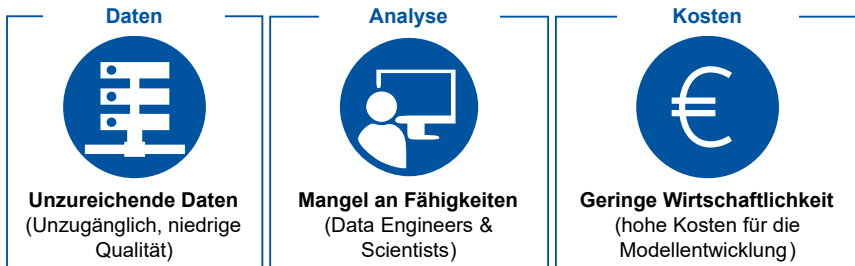


Abbildung 1.2: Hindernisse für erfolgreiche Projekte im Bereich der vorausschauenden Wartung ([McK121]), die in dieser Dissertation behandelt werden.

Forschungsansatz In dieser Dissertation werden Konzepte für die Datenvorverarbeitung und Datenanalyse entwickelt, um den Verschleißzustand des Stempels während des Feinschneidens in einer Laborumgebung mit einer industriellen Feinschneidanlage und in einer industriellen Feinschneidumgebung mit Körperschallsignalen zu überwachen. Körperschallsignale eignen sich aufgrund ihrer geringen Kosten und der einfachen Installation besonders gut für industrielle Umgebungen. Im Gegensatz zu Kraftsensoren sind die Signale jedoch aufgrund der Komplexität der resultierenden Signale schwieriger zu interpretieren [KOLL18] und vorzuverarbeiten.

Diese Herausforderungen werden durch den Einsatz und die Kombination geeigneter Algorithmen adressiert. Es wurde eine Pipeline entwickelt, die Data-Mining-Techniken einsetzt, um systematisch Segmente zu extrahieren, die Informationen über den Stemperverschleiß enthalten, und anschließend zugrundeliegende Muster in den Daten aufzudecken, um das Problem 'Unzureichende Daten' zu lösen. Darüber hinaus wird ein Proxy für den Stemperverschleiß vorgeschlagen, in der Laborumgebung beobachtet und bewertet und zum Labeling eines umfassenden Datensatzes verwendet. Dieser Datensatz dient zum Training und zur Evaluierung überwachter maschineller Lernmodelle, wobei sowohl die Modellgüte als auch Aspekte der erklärbaren KI (Explainable AI) untersucht werden. Die Ergebnisse der Analysen werden auf die industriellen Datensätze angewandt, indem ein skalarer Indikator für die Überwachung des Werkzeugzustands entwickelt und seine Entwicklung über die Datensätze hinweg bewertet wird. Es zeigt sich, dass der Indikator Informationen zur Identifizierung von Hubserien enthält, die letztlich früher als erwartet eingestellt wurden, und damit entscheidende Einblicke in die zugrunde liegende Dynamik industrieller Feinschneidprozesse liefert. Diese Erkenntnisse erleichtern eine bessere Entscheidungsfindung und ermöglichen proaktive Wartungsstrategien, die kostspielige Ausfälle verhindern und die Produktionseffizienz optimieren können. Die in dieser Dissertation dokumentierte Arbeit befasst sich somit direkt mit den Herausforderungen 'Mangel an Fähigkeiten' und 'Geringer wirtschaftlicher Ertrag' bei vorausschauenden Wartungsprogrammen, indem sie datengetriebene Modellierungsansätze und Pipelines vorschlägt und bewertet und so dazu beiträgt, die mit der Modellentwicklung verbundenen Kosten zu senken.

Beitrag Die in dieser Dissertation dokumentierte Arbeit leistet einen Beitrag zum Wissen über die Zustandsüberwachung in der Blechumformung, indem sie einen neuartigen datengetriebenen Rahmen zur Extraktion, Vorverarbeitung und Analyse von Schallemissionsdaten

für die Überwachung des Stempelverschleißes beim Feinschneiden bereitstellt. Darüber hinaus wird eine Reihe wichtiger Signalmerkmale für die Vorhersage des Stempelverschleißes aus einer umfangreichen Datenerfassung und -analyse abgeleitet.